

# ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE MEZCLAS Y LIGANTES BITUMINOSOS UTILIZANDO MODELOS DE VISCOELASTICIDAD FRACCIONARIA

M. Lagos Varas, Aitor C. Raposeiras, D. Movilla-Quesada, J.P. Arenas

## RESUMEN

Este estudio se centra en el comportamiento viscoelástico de mezclas bituminosas compuestas de diferentes partículas de agregado mineral unidas mediante un aglutinante bituminoso. Las mezclas bituminosas son el material compuesto más utilizado en la construcción de capas de pavimentos flexibles. El estudio mecánico de estos materiales se realiza actualmente utilizando modelos viscoelásticos como el modelo de Burgers. Sin embargo, este modelo solo se limita a explicar algunos de los fenómenos viscoelásticos de una mezcla bituminosa, principalmente, por que fue desarrollado para explicar el comportamiento reológico de un material único con naturaleza dual (elástico y viscoso) y no para un conjunto de materiales como la mezcla bituminosa. Este trabajo presenta un nuevo enfoque, que proporciona un marco más apropiado para el desarrollo de mezclas y ligantes bituminosos. El modelo presentado asume una partícula de árido limitada por un aglomerante bituminoso, el cual, fue desarrollado mediante la utilización de ecuaciones diferenciales fraccionarias, para la simulación de los fenómenos de fluencia y recuperación. Los resultados obtenidos demuestran que a diferencia del modelo de Burgers, el nuevo modelo puede ajustar las deformaciones a fluencia y predecir el comportamiento de recuperación al final de cada ciclo. Los datos entregados por el modelo cuantifican las propiedades mecánicas del esqueleto mineral de la mezcla y del ligante bituminoso, permitiendo correlacionar los ensayos de fluencia y recuperación para mezclas, con las dispuestas en el reómetro de corte dinámico mediante el ensayo MSCR (The Multiple Stress Creep Recovery), generando mayor detalle de las propiedades reológicas y mejorando el diseño de mezclas bituminosas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ahmedzade, Perviz, Kadir Demirelli, Taylan Günay, Fatih Biryani, and Omar Alqudah. "Effects of Waste Polypropylene Additive on the Properties of Bituminous Binder." *Procedia Manufacturing* 2, no. February (2015): 165–70.
- [2] Baaj, Hassan, Peter Mikhailenko, Haya Almutairi, and Herve Di Benedetto. "Recovery of Asphalt Mixture Stiffness during Fatigue Loading Rest Periods." *Construction and Building Materials* 158 (2018): 591–600.
- [3] Cao, Peng, Feng Jin, Zhou Changjun, and Decheng Feng. "Investigation on Statistical Characteristics of Asphalt Concrete Dynamic Moduli with Random Aggregate Distribution Model." *Construction and Building Materials* 148 (2017): 723–33.
- [4] Celauro, C., C. Fecarotti, A. Pirrotta, and A. C. Collop. "Experimental Validation of a Fractional Model for Creep/Recovery Testing of Asphalt Mixtures." *Construction and Building Materials* 36 (2012): 458–66.
- [5] Chen, Jiaqi, Hao Wang, Maoyun Li, and Liang Li. "Evaluation of Pavement Responses and Performance with Thermal Modified Asphalt Mixture." *Materials & Design* 111 (2016): 88–97.
- [6] D, Rong Luo Ph, Hanqi Liu, Ph D Candidate, and Yuqing Zhang Ph D. "Characterization of Linear Viscoelastic , Nonlinear Viscoelastic and Damage

Stages of Asphalt Mixtures.” *Construction and Building Materials* 125 (2016): 72–80.

[7] Dong, Fuqiang, Xin Yu, Tianyu Wang, Long Yin, Ning Li, Jingjing Si, and Jia Li. “Influence of Base Asphalt Aging Levels on the Foaming Characteristics and Rheological Properties of Foamed Asphalt.” *Construction and Building Materials* 177 (2018): 43–50.

[8] Fecarotti, Claudia, Clara Celauro, and Antonina Pirrotta. “Linear ViscoElastic (LVE) Behaviour of Pure Bitumen via Fractional Model.” *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 53 (2012): 450–61.

[9] G., Chang Kuo-Neng, and Meegoda Jay N. “Micromechanical Simulation of Hot Mix Asphalt .” *Journal of Engineering Mechanics* 123, no. 5 (May 1, 1997): 495–503. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:5\(495\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:5(495)).

[10] Graziani, Andrea, Carlotta Godenzoni, Fabrizio Cardone, and Maurizio Bocci. “Effect of Curing on the Physical and Mechanical Properties of Cold-Recycled Bituminous Mixtures.” *Materials & Design* 95 (2016): 358–69.

[11] Han, Meizhao, Jing Li, Yaseen Muhammad, Dianhao Hou, Fenglei Zhang, and Yuhua Yin. “Effect of Polystyrene Grafted Graphene Nanoplatelets on the Physical and Chemical Properties of Asphalt Binder.” *Construction and Building Materials* 174 (2018): 108–19.

[12] Lagos-Varas, M., D. Movilla-Quesada, J.P. Arenas, A.C. Raposeiras, D. Castro-Fresno, M.A. Calzada-Pérez, A. Vega-Zamanillo, and J. Maturana. “Study of the Mechanical Behavior of Asphalt Mixtures Using Fractional Rheology to Model Their Viscoelasticity.” *Construction and Building Materials*, 2019.

[13] Lei, Yong, Hainian Wang, Xi Chen, Xu Yang, Zhanping You, Shi Dong, and Junfeng Gao. “Shear Property , High-Temperature Rheological Performance and Low-Temperature Flexibility of Asphalt Mastics Modified with Bio-Oil.” *Construction and Building Materials* 174 (2018): 30–37.

[14] Li, Peilong, Xiuming Jiang, Kai Guo, Yu Xue, and Hao Dong. “Analysis of Viscoelastic Response and Creep Deformation Mechanism of Asphalt Mixture.” *Construction and Building Materials* 171 (2018): 22–32.

[15] Lin, Juntao, Jinxiang Hong, and Yue Xiao. “Dynamic Characteristics of 100% Cold Recycled Asphalt Mixture Using Asphalt Emulsion and Cement.” *Journal of Cleaner Production* 156 (2017): 337–44.

[16] Loverro, Adam. “Fractional Calculus: History, Definitions and Applications for the Engineer.” Report, 2004, 1–28.

[17] Ma, Tao, Hao Wang, Deyu Zhang, and Yao Zhang. “Heterogeneity Effect of Mechanical Property on Creep Behavior of Asphalt Mixture Based on Micromechanical Modeling and Virtual Creep Test.” *Mechanics of Materials* 104 (2017): 49–59.

[18] Mangiafico, Salvatore, Hervé Di Benedetto, Cédric Sauzéat, François Olard, Simon Pouget, and Luc Planque. “Effect of Colloidal Structure of Bituminous Binder Blends on Linear Viscoelastic Behaviour of Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement.” *Materials and Design* 111 (2016): 126–39.

[19] Saltan, Mehmet, Serdal Terzi, and Sebnem Karahancer. “Examination of Hot Mix Asphalt and Binder Performance Modified with Nano Silica.” *Construction and Building Materials* 156 (2017): 976–84.

[20] Shi, Xingang, Liangcai Cai, Wei Xu, Jing Fan, and Xinhang Wang. “Effects of Nano-Silica and Rock Asphalt on Rheological Properties of Modified Bitumen.” *Construction and Building Materials* 161 (2018): 705–14.

- [21] Singh, Dharamveer, and Dheeraj Sawant. "Understanding Effects of RAP on Rheological Performance and Chemical Composition of SBS Modified Binder Using Series of Laboratory Tests." *International Journal of Pavement Research and Technology* 9, no. 3 (May 1, 2016): 178–89.
- [22] Sunarjono, Sri. "Performance of Foamed Asphalt under Repeated Load Axial Test." *Procedia Engineering* 54 (2013): 698–710.
- [23] Wu, Qiang, Chong Wang, Rui Liang, Yongchang Liu, Jixiang Cheng, and Yang Kang. "Fractional Linear Viscoelastic Constitutive Relations of Anhydride-Cured Thermosetting Rubber-like Epoxy Asphalt Binders." *Construction and Building Materials* 170 (2018): 582–90.
- [24] Yao, Zhanyong, Jizhe Zhang, Faliang Gao, Shengjie Liu, and Tenghai Yu. "Integrated Utilization of Recycled Crumb Rubber and Polyethylene for Enhancing the Performance of Modified Bitumen." *Construction and Building Materials* 170 (2018): 217–24.
- [25] Zaumanis, M, L D Poulidakos, and M N Partl. "Performance-Based Design of Asphalt Mixtures and Review of Key Parameters." *Materials & Design* 141 (2018): 185–201.

# ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE MEZCLAS Y LIGANTES BITUMINOSOS UTILIZANDO MODELOS DE VISCOELASTICIDAD FRACCIONARIA

Manuel Lagos<sup>1</sup>, Aitor Raposeiras<sup>2</sup>, Diana Movilla<sup>3</sup>, Jorge Arenas<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, manuel.lagos@uach.cl

<sup>2</sup> Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, aitor.raposeiras@uach.cl

<sup>3</sup> Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, diana.movilla@uach.cl

<sup>4</sup> Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, jparenas@uach.cl

## Resumen

Este estudio se centra en el comportamiento viscoelástico de mezclas bituminosas compuestas de diferentes partículas de agregado mineral unidas mediante un aglutinante bituminoso. Las mezclas bituminosas son el material compuesto más utilizado en la construcción de capas de pavimentos flexibles. El estudio mecánico de estos materiales se realiza actualmente utilizando modelos viscoelásticos como el modelo de Burgers. Sin embargo, este modelo solo se limita a explicar algunos de los fenómenos viscoelásticos de una mezcla bituminosa, principalmente, por que fue desarrollado para explicar el comportamiento reológico de un material único con naturaleza dual (elástico y viscoso) y no para un conjunto de materiales como la mezcla bituminosa. Este trabajo presenta un nuevo enfoque, que proporciona un marco más apropiado para el desarrollo de mezclas y ligantes bituminosos. El modelo presentado asume una partícula de árido limitada por un aglomerante bituminoso, el cual, fue desarrollado mediante la utilización de ecuaciones diferenciales fraccionarias, para la simulación de los fenómenos de fluencia y recuperación. Los resultados obtenidos demuestran que a diferencia del modelo de Burgers, el nuevo modelo puede ajustar las deformaciones a fluencia y predecir el comportamiento de recuperación al final del cada ciclo. Los datos entregados por el modelo cuantifican las propiedades mecánicas del esqueleto mineral de la mezcla y del ligante bituminoso, permitiendo correlacionar los ensayos de fluencia y recuperación para mezclas, con las dispuestas en el reómetro de corte dinámico mediante el ensayo MSCR (The Multiple Stress Creep Recovery), generando mayor detalle de las propiedades reológicas y mejorando el diseño de mezclas bituminosas.

**Palabras Clave:** Viscoelasticidad, Mezcla bituminosa, Reología fraccionaria, Ligante bituminoso

## 1 Introducción

En la actualidad, las mezclas asfálticas son el material compuesto más empleado para la construcción de firmes flexibles [1]. Su principal utilización en capas de rodadura y base permite construir pavimentos de calidad, destinados a todo tipo de tráfico asegurando calidad, comodidad y resistencia en periodos relativamente largos.

Una mezcla bituminosa se obtiene a partir del mezclado de árido con ligante bituminoso que a su vez envuelve las partículas mediante una película continua y homogénea [2]. El diseño de la capa de rodadura de un pavimento flexible se basa principalmente en las capacidades reológicas del ligante, propiedades volumétricas, condiciones de carga vehiculares y agentes externos como la temperatura [3]. Los materiales que integran las mezclas asfálticas se subdividen en dos grandes categorías: **(1) ligante bituminoso**, elemento principal por el alto rendimiento mecánico frente a la temperatura, frecuencia de carga, susceptibilidad térmica y termoplaticidad [4]; **(2) áridos**, material granular que procede de rocas de distinta naturaleza, siendo sometidas a un tratamiento industrial simple, como clasificación por tamaño, molienda y/o lavado.

El ligante bituminoso posee una reología que está determinada por un comportamiento viscoelástico, es decir, exhibe características tanto viscosas como elásticas, originando una relación tensión

deformación dependiente del tiempo [5]. El comportamiento de las deformaciones de los ligantes se caracteriza a través de modelos matemáticos que dependen de los parámetros reológicos del material [6]. Sin embargo, existen estudios donde se utilizan modelos mecánicos de viscoelasticidad para simular las deformaciones de mezclas bituminosas, olvidando las limitaciones prácticas que poseen estos modelos al caracterizar un conjunto de materiales, ya que su creación nace a partir de un razonamiento en base a un material único con naturaleza dual (elástico y viscoso). Los modelos matemáticos de viscoelasticidad se basan en la ley de Hooke y la ley de viscosidad de los fluidos de Newton [7]. A consecuencias de estas leyes, se originan modelos más complejos (Figura1) como Maxwell, Kelvin-Voigt, Zener, Burgers, entre otros [8].

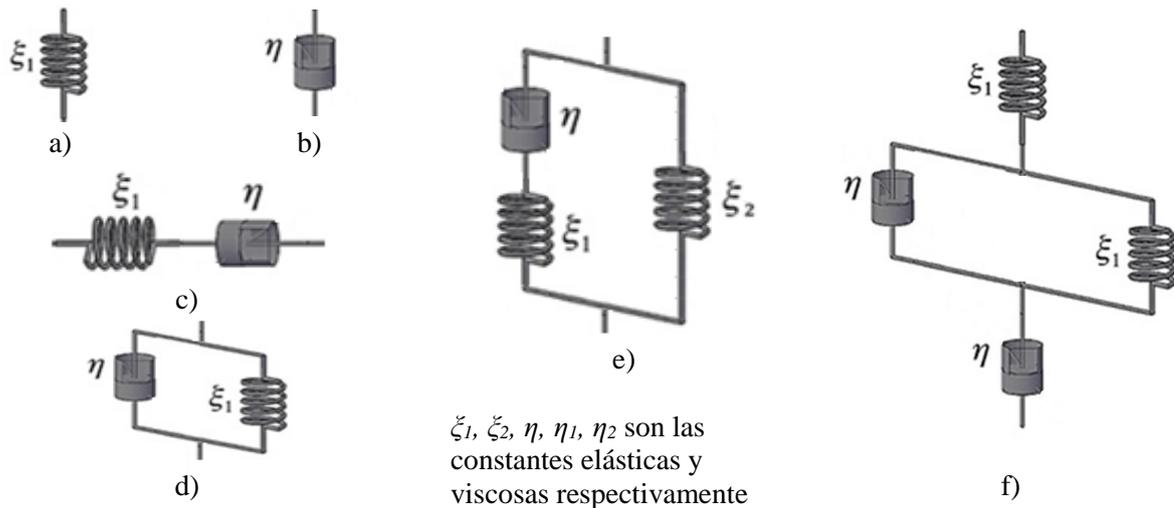


Figura 1. Modelos mecánicos, a) ley de Hooke; b) ley de Newton; c) Modelo Maxwell; d) Modelo Kelvin-Voigt; e) Modelo de Zener; f) Modelo Burgers

Según Chang *et al.* [9] el modelo de Burgers simula mejor las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas, en comparación a los modelos de propuestos por Maxwell y Kelvin-Voigt, siendo apropiado utilizar para la determinación de la componente viscosa de los materiales [10]. La importancia de ajustar las curvas experimentales con los modelos mecánicos es lograr predecir las respuestas reológicas de las mezclas y/o ligantes bituminosos. Una desventaja que posee la caracterización reológica por parte de estos modelos mecánicos es controlar la variabilidad de las pruebas experimentales, debido a las complejas inferencias artificiales y ambientales de los laboratorios [11]. Algunas investigaciones afirman que ningún modelo comúnmente utilizado en la literatura, es ideal para predecir deformaciones de mezclas bituminosas, ya que cada uno de ellos tiene ventajas y desventajas, como, predecir las deformaciones ocurridas en ensayos de carga y descarga con un modelo único [12].

Unos de los fenómenos más importantes en la deformación de mezclas bituminosas, es la fluencia y la recuperación de un ciclo estático de carga-descarga [7]. El procedimiento de fluencia es la deformación ocurrida en el proceso de la carga estática, donde la temperatura tiene efectos significativos en la deformación viscoelástica [6]. Asimismo, la magnitud de la carga genera mayores velocidades de deformaciones ocasionando hasta la rotura del material [13]. Seguidamente, el fenómeno de recuperación es la capacidad que posee el material para redimir las deformaciones obtenidas en el proceso de fluencia y evitar la plastificación de la mezcla y ligante bituminoso.

El uso de ciclos de carga-descarga estática también es utilizada en ligantes bituminosos, para evaluar la elasticidad retardada y la recuperación alargada [14]. El ensayo de fluencia y recuperación múltiple (MSCR) es una aproximación de las deformaciones que ocurrirán en mezclas bituminosas bajo diferentes condiciones de carga y/o temperatura en ligantes. El MSCR permite establecer en múltiples ciclos la tasa de eficiencia y la deformación plástica acumulada de las propiedades viscoelásticas de ligantes convencionales y modificados [15]. Por ende, la comprensión del rendimiento de fluencia y

recuperación de ligantes y/o mezclas bituminosas, se basa en conocer las propiedades reológicas de los materiales como elasticidad y viscosidad.

En referencia a las actividades experimentales, se presenta una amplia gama de investigaciones con el uso de modelos viscoelásticos en mezclas bituminosas. En este contexto, el mayor detalle se alcanza con la utilización de ecuaciones diferenciales fraccionarias, que generan operadores de orden no entero para interpretar la transición reológica del estado elástico a viscoso [16]. Por consiguiente, los modelos fraccionarios adaptan mejor las mediciones experimentales con menos parámetros en comparación a los convencionales. El modelo de Burgers fraccionario propuesto por Oeser, requiere cuatro parámetros para describir la deformación progresiva de un ligante bituminoso y ajustar los datos experimentales con mayor precisión [12]. Aunque este modelo permita adaptar correctamente las deformaciones de un material viscoelástico desde su estado elástico a viscoso, no es solución cuando se somete para el análisis de un conjunto de materiales como una mezcla bituminosa (árido-ligante).

Es por ello, que la deficiencia de los modelos mencionados es que no poseen una caracterización detallada para el elemento árido, y con ello, no existe un método eficaz que permita correlacionar los datos de las deformaciones ocurridas en mezclas, con las dispuestas en un reómetro de corte dinámico (DSR) el cual estudia la reología solo del ligante bituminoso.

Con el fin de clasificar las propiedades reológicas de una mezcla bituminosa, en las siguientes secciones de este documento se presenta un nuevo enfoque relacionado al modelamiento viscoelástico de materiales. Siendo el objetivo general, optimizar la metodología de diseño de mezclas bituminosas, a partir de una correlación reológica de las propiedades de ligante y árido obtenidas mediante modelos mecánicos de viscoelasticidad fraccionaria. La metodología que se presenta permite distinguir las componentes elásticas de los materiales árido-ligante, consiguiendo comprender y predecir las deformaciones y ligantes bituminosos, para reducir los índices de contaminación y tiempo de ensayo.

## 2 Materiales y métodos

### 2.1 Materiales

Los ligantes bituminosos utilizados son de carácter convencional y modificado, las propiedades físicas básicas se resumen en la tabla 1, recogiendo características y especificaciones básicas. El árido mineral utilizado es de naturaleza ofítica. Este material se emplea en capas de rodadura debido a sus cualidades antideslizantes, garantizando la textura superficial necesaria en un periodo de tiempo.

El conjunto de materiales mencionados se utiliza para una mezcla bituminosa semidensa tipo AC16S. Las probetas Marshall se fabrican a una temperatura de 135°C. La compactación de las probetas se realiza a 75 golpes por cara. Posteriormente, se fabrican una serie de probetas confeccionadas solamente con ligantes bituminoso a una temperatura de 135°C, para ser ensayadas en un reómetro de corte dinámico “DHR-1 de TA instrument”.

Tabla 1. Parámetros de los ligantes bituminosos

Grado de ligante bituminoso	P. Penetración [mm/10]	P. Reblandecimiento [°C]
B50/70	57.00	51.60
B70/100	70.00	48.50
PMB45/80-65	49.50	72.30

### 2.2 Métodos experimentales

#### 2.2.1 Fluencia y Recuperación de mezclas bituminosas

La prueba de fluencia y recuperación estática uniaxial se realiza mediante la máquina de prueba universal para mezclas bituminosas, donde se desarrollan ensayos a diferentes temperaturas y frecuencias de cargas. Se determinan las propiedades reológicas del material a una carga constante predeterminada en un periodo de tiempo establecido [11]. Los ensayos se realizan para un rango de

temperatura comprendido entre  $-10^{\circ}\text{C}$  y  $35^{\circ}\text{C}$  (con una escala de  $15^{\circ}\text{C}$ ), con una carga del tipo Heaviside de 5 kN. Además, para  $20^{\circ}\text{C}$  se ensaya un barrido de cargas de 3 y 6 kN (con una escala de 1kN).

### 2.2.2 Fluencia y recuperación de estrés múltiple (MSCR) para ligantes bituminosos

El método de fluencia y recuperación múltiple (MSCR) es una prueba que permite estudiar las propiedades de los ligantes convencionales y/o modificados. La finalidad del ensayo es determinar el impacto sobre las resistencias al ahuellamiento y evaluar la tasa de eficiencia de la modificación de aditivos y modificadores en ligantes bituminosos [17]. La prueba se realiza a una temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$ , desarrollando 10 ciclos de carga-descarga continuas. La carga se determina para una deformación del 0.1% en 1s y la recuperación se prolonga para un tiempo estimado de 39 s.

## 2.3 Métodos teóricos

### 2.3.1 Modelo reológico para mezclas bituminosas

El modelo mecánico de viscoelasticidad bituminosa se genera a partir de una partícula de árido envuelto en una película continua de ligante bituminoso, es decir, un elemento elástico rodeado por un conjunto elástico-viscoso (Burgers modificado)[18]. La mezcla bituminosa posee un modelo mecánico, centralizado, que revela el comportamiento de sus deformaciones y detalla el carácter independiente de las propiedades reológicas del árido y del ligante, produciendo compresión cuando se somete a pruebas mecánicas [19].

La Figura 2, muestra esta relación a partir de la caracterización del árido, representada por la constante de elasticidad  $\xi_2$ . Las constantes de elasticidad y viscosidad representativas del ligante bituminoso, son  $\xi_1$  y  $\eta$ , respectivamente.

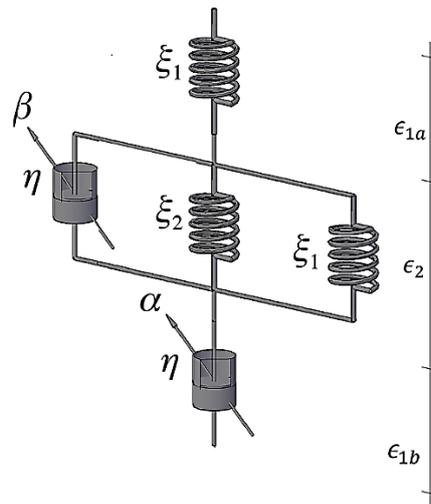


Figura 1. Modelo de viscoelasticidad fraccionaria para mezclas bituminosas

La ecuación diferencial del modelo viscoelástico de la mezcla asfáltica propuesta es:

$$D_t^{\alpha+\beta} \epsilon + \frac{\xi_1 + \xi_2}{\eta} D_t^{\alpha} \epsilon = \frac{1}{\xi_1} D_t^{\beta+\gamma} \sigma + \frac{1}{\eta} D_t^{\beta} \sigma + \frac{1}{\eta} D_t^{\alpha} \sigma + \frac{\xi_1 + \xi_2}{\xi_1 \eta} D_t^{\gamma} \sigma + \frac{\xi_1 + \xi_2}{\eta^2} \sigma \quad (1)$$

Donde  $\epsilon(t)$  es la deformación,  $\sigma(t)$  es la tensión,  $D_t^{\alpha}$ ,  $D_t^{\beta}$ ,  $D_t^{\gamma}$  se definen como las derivadas fraccionarias con respecto al tiempo  $t$  y los exponentes fraccionarios  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , respectivamente. Es importante enfatizar, que los exponentes fraccionarios deben tener los mismos rangos, entre 0 y 1, para satisfacer las ecuaciones diferenciales clásicas.

En las siguientes secciones de este documento, se explica por qué el nuevo modelo explica la deformación de la mezcla de una manera diferente a la descrita por el modelo de Burgers y permite una descripción precisa del comportamiento de una mezcla bituminosa, durante sus diferentes fases en función de la combinación de los materiales que forman la mezcla.

El fenómeno de fluencia aparece cuando el material está sujeto a un esfuerzo constante en un momento determinado por una función de carga de un solo paso  $\sigma = \sigma_0 H(t)$ , donde  $H(t)$  es la función de paso de la unidad Heaviside [20]. A partir de lo anterior, y volviendo a la ecuación diferencial anterior (1), se obtiene la función que describe la fluencia para mezclas bituminosas (2).

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{\xi_1} + \frac{\sigma_0}{\eta} \frac{t^\alpha}{\Gamma(\alpha + 1)} + \frac{\sigma_0}{\eta} t^\beta \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(-\frac{M}{\eta} t^\beta\right)^k}{\Gamma(1 + \beta + \beta k)} \quad (2)$$

Donde  $M = \xi_2 + \xi_1$  y  $\Gamma(\cdot)$  es la función Gamma.

El primer miembro de la ecuación 2 pertenece al ligante y es el salto elástico instantáneo típico de materiales viscoelásticos, además, es el punto crítico de la viscoelasticidad lineal [21]. Seguidamente, el cambio de curvatura da origen a la viscoelasticidad no lineal y corresponde al sistema completo (árido-ligante), el material aún está en etapa de no daño plástico y está representada en la ecuación 2, por el tercer término denominada serie infinita de Mittag-Leffler, que depende del parámetro  $\beta$ . El cual puede alcanzar un valor de 1, ya que actúa al mismo tiempo que la elasticidad del árido en un rango recuperable.

El parámetro  $\alpha$  aparece en el segundo término de la ecuación 2 y representa el último estado del fenómeno de fluencia o etapa de daño plástico, indica que, si este parámetro alcanza un valor de 1, representaría un material completamente viscoso (amortiguador de Newton). Sin embargo, esta suposición está lejos de la realidad, debido a la dependencia del árido en la mezcla bituminosa, por ende, este parámetro depende exclusivamente de la capacidad del ligante, y no de la mezcla completa [22].

El fenómeno de recuperación comienza cuando se libera la tensión inicial aplicada en la prueba de fluencia [23]. Esta recuperación es dependiente del tiempo y característica de cada material, depende tanto del tipo de carga que se aplica, como de la variación de temperatura a la que está sujeta la muestra de mezcla bituminosa [24]. Para describir el proceso, es necesario considerar la ecuación diferencial fraccional (1), eliminando el concepto de estrés inicial  $\sigma_0 = 0$ . Sin embargo, surge una controversia, ya que no es fácil entender cómo funcionan las ecuaciones diferenciales fraccionarias, cuando las condiciones iniciales no son cero. La aplicación de la transformada de Laplace es complicada, ya que actualmente no existe un significado físico para estas condiciones iniciales. Por lo tanto, el lado derecho de la Ecuación (1) se nula dando origen a la ecuación que describe el comportamiento de recuperación de mezclas (3):

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_M^0(0) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(-\frac{M}{\eta} t^\beta\right)^k}{\Gamma(1 + \beta k)} + \varepsilon_\infty^0(0) \quad (3)$$

La Ecuación (3) explica cómo el material se recupera de la deformación al retirar la carga. Donde comienza con una deformación inicial definida como  $\varepsilon_\infty^0(0)$  y desarrollada por la serie infinita Mittag-Leffler multiplicada por un factor de ajuste  $\varepsilon_M^0(0)$  [25]. La función de recuperación no está desarrollada por el exponente fraccionario  $\alpha$ , ya que esta hace referencia a la deformación plástica la cual es no recuperable.

### 2.3.2 Modelo reológico para ligantes bituminosos

El modelo reológico para ligantes bituminosas (Figura 3), se basa en una modificación reológica del modelo de Burgers. Esta se logra al extraer la representación mecánica del árido “ $\xi_2$ ” del modelo planteado anteriormente para mezclas bituminosas. El modelo resultante se diferencia al planteado por Burgers porque solo tiene dos constantes reológicas ( $\xi_1$  y  $\eta$ ), representando la elasticidad y viscosidad del ligante bituminoso.

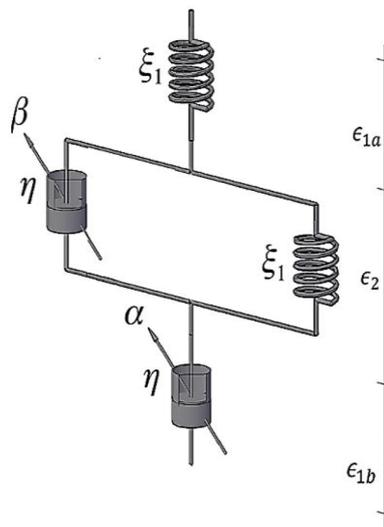


Figura 3. Modelo de viscoelasticidad fraccionaria para ligantes bituminosos

La ecuación para el ajuste del fenómeno de recuperación queda a expuesta a continuación en (4):

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_M^0(0) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(-\frac{\xi_1}{\eta} t^\beta\right)^k}{\Gamma(1 + \beta k)} + \varepsilon_\infty^0(0) \quad (4)$$

### 3 Resultados y discusión

#### 3.1 Análisis de fluencia y recuperación de mezclas bituminosas

En la Figura 4, se observa las deformaciones ocurridas al someter las probetas de mezclas bituminosas a la variación de diferentes magnitudes de cargas estáticas. Al aumentar la magnitud las deformaciones aumentan a cierta velocidad que depende de cada tipo de ligante utilizado. La mezcla bituminosa con B70/100 (Figura 4b) es quien alcanza mayor deformación en toda la escala de carga ensayadas. La carga de 6 kN alcanza una deformación máxima en el proceso de fluencia de 0.6 mm como deformación final. En segundo lugar, la mezcla fabricada con B50/70 (Figura 4a) alcanza una deformación final de 0.52 mm para una carga de 6 kN. Finalmente, la mezcla bituminosa con PMB 45/80-65 (Figura 4c) demuestra alcanzar menor deformación para los 6 kN en comparación a las mezclas con ligantes convencionales. Este efecto, se debe a la incorporación de los polímeros elastómeros de caucho en el ligante modificado, los cuales modifican el ligante con la finalidad de reducir el calor generado por las cargas, retardando el reblandecimiento y plastificación de la mezcla.

El fenómeno de recuperación ocurrido al retirar la carga demuestra el grado de plasticidad ocasionado en el proceso de fluencia. Cuando la deformación es totalmente elástica su recuperación es completa, vale decir, la probeta de mezcla bituminosa vuelve a su estado físico inicial. Para los ensayos realizados a 20°C ninguna muestra demuestra esta condición, ya que la sobre carga y la duración de esta generó deformación plástica. Las muestras con PMB 45/80-65 lograron recuperar mayor deformación, demostrando ser más elásticas que las mezclas con ligante convencional.

Al ajustar los datos experimentales a partir de las ecuaciones de fluencia y recuperación del modelo de viscoelasticidad de mezclas. Los resultados teóricos (Tabla 2) demuestran que el salto instantáneo que se genera al someter la probeta a una carga inicial es el punto crítico de la deformación viscoelástica lineal, este valor es directamente proporcional a la magnitud de carga, ya que su determinación está relacionada con el cociente entre la deformación y la magnitud de la fuerza. Las mezclas con B70/100 adquiere mayores valores de  $\xi_1$  en comparación a las que contienen B50/70. La mezcla con PMB45/80-

65 aumenta su valor elástico hasta un máximo de  $\zeta_1 = 7.238$  MPa demostrando que el polímero de caucho genera mayor elasticidad y menor salto elástico.

Posterior al primer salto elástico, comienza una deformación viscoelástica no lineal recuperable. Esta deformación es desarrollada por el sistema en paralelo del modelo mencionado de mezclas. El salto elástico que proviene de esta deformación establece un valor que suma las elasticidades del ligante bituminoso y del árido. La curvatura que se obtienen experimentalmente está demostrada por la serie infinita de Mittag-Leffler simbolizada con el exponente fraccionario  $\beta$ . El valor de este segundo salto elástico  $M$  establece por diferencia que el árido de la mezcla tiene una constante de Young aproximadamente de  $\zeta_2 = 636.4$  MPa como media estándar y su valor caracteriza la capacidad del límite elástico de la piedra ofita.

El exponente fraccionario  $\beta$  se mantiene aproximadamente constante para las mezclas convencionales para las cargas 3, 4, 5 kN. Por ende, la magnitud de la carga no afecta el comportamiento transitorio de la deformación recuperable antes de lograr la pendiente constante (exponente fraccionario  $\alpha$ ). Las mezclas con PMB45/80-65 abarca un margen más amplio de crecimiento viscoelástico recuperable alcanzando valores mayores de  $\beta$  en comparación a las convencionales.

La última fase de la fluencia está caracterizada por una recta con pendiente constante donde la viscoelasticidad es no lineal y no recuperable. Cada mezcla bituminosa adopta cierta deformación final determinada por la constante  $\eta$  y el parámetro  $\alpha$  definida por el último amortiguador del modelo. El valor del parámetro  $\alpha$  disminuye con el aumento de la carga aplicada. Las mezclas con B70/100 poseen pendiente con mayor desarrollo ocasionando más deformación no recuperable. Las mezclas con ligante B50/70 y PMB45/80-65 alcanzan valores similares de  $\alpha$  siendo menos viscosas. Es por ello, que la mezcla con ligante B70/100 recuperará menores deformaciones en el final del ciclo, producto de su fluencia plástica.

El fenómeno de recuperación demostró mediante los ajustes de curva, que las propiedades reológicas del árido y del ligante bituminoso se mantienen iguales. Asimismo, la constante  $\beta$  es del mismo valor reológico para ambos fenómenos de fluencia y recuperación. El ajuste de curva estableció que el PMB45/80-65 es el que recupera mayor deformación, al poseer un mayor desarrollo del exponente  $\beta$ . El salto elástico instantáneo de la recuperación  $\epsilon_{\infty}^0$  aumenta con la magnitud de la carga, las mezclas con B70/100 alcanzan mayor salto elástico de recuperación alcanzando un valor máximo para los 6 kN de 0.4831 mm. Posterior al salto elástico, se comienza a desarrollar una recuperación dependiente del tiempo, la cual está matemáticamente relacionada a la multiplicación de la serie infinita Mittag-Leffler y un factor de ajuste  $\epsilon_M^0$ . Los resultados indican que el valor de ajuste es directamente proporcional a la carga y la serie infinita mantiene los valores del fenómeno de fluencia. El parámetro  $\alpha$  no es considerado para el fenómeno de recuperación, ya que su interpretación física se basa en la deformación no recuperable, por ende, una mezcla bituminosa que obtenga mayor desarrollo del parámetro  $\beta$  demostrará un menor daño plástico. Al variar la magnitud de la carga las mezclas convencionales tienden a mantener constante el parámetro  $\beta$ , ya que la transformación física del ligante bituminoso es rápida, originando mayor trabajo por parte del exponente fraccionario  $\alpha$ . Las mezclas con ligante modificado aumentan el valor de  $\beta$ , producto de la transformación lenta del ligante, demostrando menores valores de deformaciones no recuperables.

Las propiedades reológicas  $\zeta_1$ ,  $\zeta_2$  y  $\eta$  obtenidas en los ciclos carga-descarga se mantienen constantes en todo el proceso de los ciclos de fluencia y recuperación para cada ligante y tipo de árido.

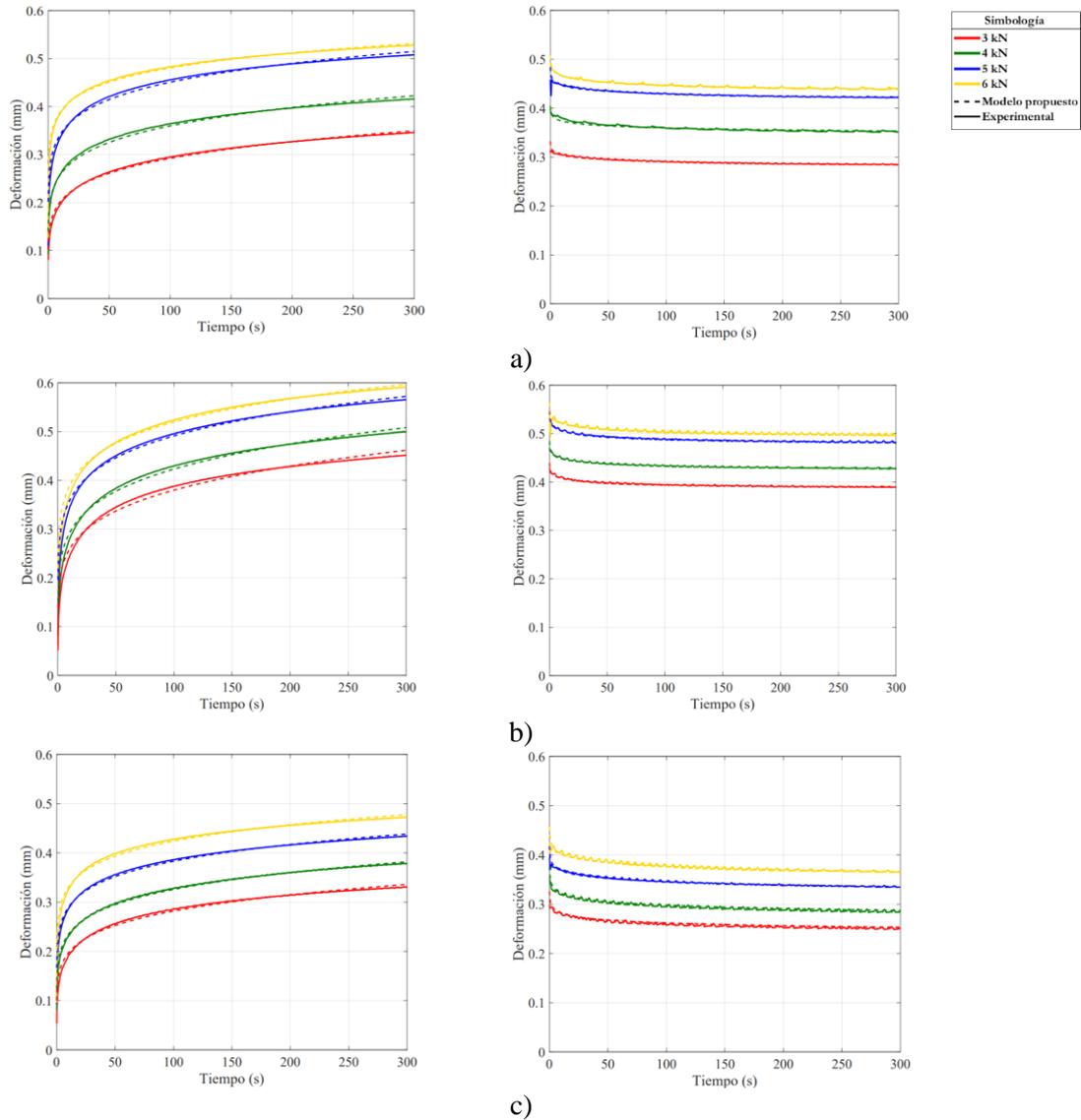


Figura 4. Fluencia y recuperación en mezclas bituminosas. a) B50/70; b) B70/100; c) PMB45/80-65

Tabla 2. Fluencia y recuperación de mezclas bituminosas para una temperatura de 20°C.

Tipo de ligante bituminoso	Carga (kN)	$\zeta_1$ (MPa)	$\zeta_2$ (MPa)	$\eta$ (MPa*s)	$\alpha$	$\beta$	$\varepsilon_{\infty}^0(0)$ (mm)	$\varepsilon_M^0(0)$ (mm)	$R^2$
B 50/70	3	3.2700	639.7	7.5070	0.2656	0.1106	0.2441	7.1420	0.99
	4	4.3600	635.0	5.1990	0.1981	0.1200	0.2995	12.0900	0.99
	5	3.8710	635.0	4.6300	0.1639	0.1276	0.3790	13.5900	0.99
	6	5.9000	635.0	3.7870	0.1243	0.1288	0.3915	18.4500	0.98
B 70/100	3	4.7470	635.3	3.6700	0.2221	0.1200	0.3533	13.6000	0.99
	4	6.6700	637.7	3.7380	0.1996	0.1200	0.3866	15.3200	0.99
	5	6.6670	635.0	3.6750	0.1770	0.1525	0.4478	15.9100	0.99
	6	9.000	635.0	3.6750	0.1586	0.2763	0.4831	15.9100	0.98
PMB 45/80-65	3	4.1180	640	5.9900	0.2344	0.0900	0.1784	14.0000	0.98
	4	4.9980	639	5.9980	0.2087	0.1203	0.2243	14.4600	0.98
	5	7.2380	635	4.4240	0.1565	0.3190	0.3270	14.4600	0.99
	6	7.2000	635	4.2400	0.1278	0.3955	0.3634	16.6300	0.99

### 3.2 Análisis de fluencia y recuperación de ligantes bituminosos

El análisis de fluencia y recuperación para los ligantes convencionales y modificado, se realiza mediante un reómetro de corte dinámico para correlacionar los datos entregados por la simulación de las mezclas bituminosas. El ensayo MSCR genera deformaciones de muestras de ligantes bituminoso, mediante ciclos múltiples a partir de un esfuerzo de torsión angular. El motivo de generar este ensayo es poder correlacionar los resultados obtenidos de mezclas bituminosas en el proceso anterior. Para ello se comparan las deformaciones en forma porcentual a una temperatura de 20°C, ya que la fuerza que interactúan en las diferentes probetas no es de la misma naturaleza.

En la Figura 5, se ilustran las deformaciones múltiples de los tres ligantes mencionados para el ensayo MSCR. Se observa que el ligante B70/100 es el que obtiene mayor deformación acumulada en los 10 ciclos terminando con una deformación del 1.72%, y ratificando el comportamiento ocurrido en mezclas bituminosas. El ligante B50/70 adopta una deformación plástica menor en comparación al B70/100 alcanzando un máximo de 0.87% en la acumulada. El ligante PMB45/80-65 mantiene su deformación en un rango inferior producto de los polímeros agregados, la máxima deformación no supera el 0.60% acumulado.

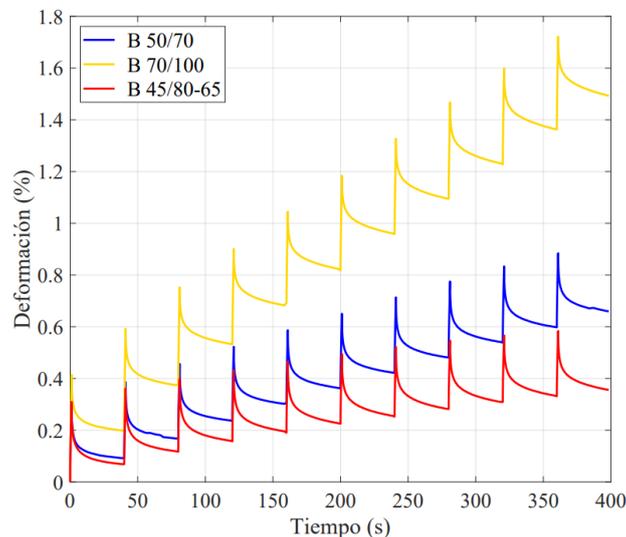


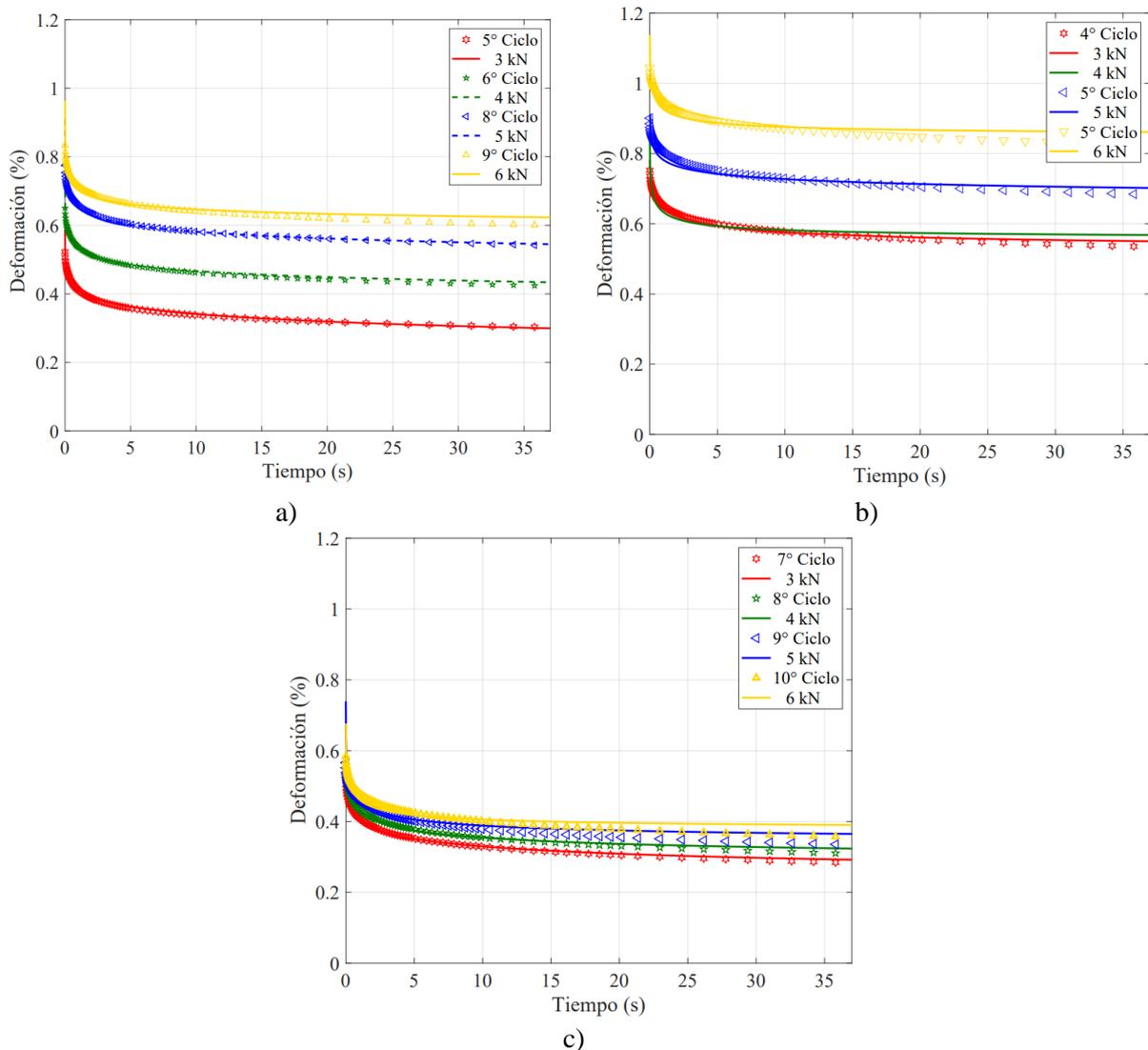
Figura 5. Fluencia y recuperación de estrés múltiple para ligantes bituminosos

Para ajustar las curvas del ensayo MSCR se debe considerar el modelo planteado anteriormente (Ecuación 4) para las deformaciones ocurridas en el fenómeno de recuperación. Para el proceso de carga o deformación a fluencia no se realiza un ajuste, ya que las curvas no demuestran diferencias claras en los estados recuperables y no recuperables para 1s. Los resultados de la simulación para ligantes bituminosos se resumen en la tabla 3. Los valores de la simulación se relacionan con el número de ciclos dependiendo del tipo de ligante bituminoso, a mayor número de ciclos menor punto de reblandecimiento tendrán los ligantes en estudio (ver tabla1). Primeramente, se observa que las propiedades reológicas pertenecientes a los ligantes bituminosos  $\xi_l$  y  $\eta$  se mantienen iguales con respecto a los cálculos anteriores en mezclas bituminosas. Esto quiere decir, que el modelo propuesto para mezclas asfálticas y para ligantes permite correlacionar los datos en los ensayos correspondiente. El motivo de que los valores del ligante se mantengan para las mismas condiciones de deformación, demuestra que no existe una reacción química en la relación árido ligante generando solo interacción física.

En la Figura 6a, se observa la recuperación del ligante B50/70 correlacionando los números de ciclos con la magnitud de cargas. Los resultados determinan que el noveno ciclo provocado en el reómetro logra la misma recuperación que aplicar una carga de 6 kN a una mezcla asfáltica. Al realizar el ajuste se demuestra que el operador fraccionario  $\beta$  se mantiene estable desde el tercer hasta el octavo ciclo, y posteriormente aumenta su valor para generar una tasa de cambio más lenta provocando mayor deformación plástica. El ligante B70/100 (Figura 6b) se correlaciona para los mismos valores reológicos

en mezclas, con ciclos inferiores al B50/70. Esto se debe al aumento de las deformaciones plásticas y aumento porcentual en la etapa de deformación no recuperable. Para los 6 kN la deformación promedio es de 0.1 % y esto se logra en el sexto ciclo del ensayo MSCR.

La deformación porcentual de las mezclas bituminosa con ligante PMB45/80-65 no genera cambios bruscos como en el caso de los ligantes convencionales. La relación entre los ensayos se logra con ciclos posteriores, ya que el ligante con polímeros genera una deformación plástica inferior. En la Figura 6c, se ilustra que el rango de deformación es inferior a los convencionales y el ajuste se logra con una deformación aproximada del 0.8%, logrando utilizar hasta el décimo ciclo. La utilización de polímeros en ligante genera un efecto importante para las deformaciones asfálticas, permite el desarrollo del parámetro del arreglo en paralelo donde las deformaciones son recuperables. Por ende, el desarrollo de ciclos de fluencia-recuperación en mezclas asfálticas puede ser acotado con las predicciones del comportamiento del ligante bituminoso.



**Figura 6.** Fluencia – Recuperación de ligantes bituminosos, a) B50/70; b) B70/100; c) PMB45/80-65

Tabla 3. Fluencia – Recuperación de ligantes bituminosos.

	N° de Ciclos	$\zeta_1$ (MPa)	$\eta$ (MPa*s)	$\beta$	$\varepsilon_{\infty}^0(0)$ (mm)	$\varepsilon_M^0(0)$ (mm)	$R^2$
B 50/70	5	3.2700	7.5070	0.1106	0.2441	7.1420	0.99
	6	4.3600	5.1990	0.1200	0.2995	12.0900	0.94
	8	3.8710	4.6300	0.1276	0.3790	13.5900	0.93
	9	5.9000	3.7870	0.1288	0.3915	18.4500	0.91
B 70/100	4	4.7470	3.6700	0.1200	0.3533	13.6000	0.81
	4	6.6700	3.7380	0.1200	0.3866	15.3200	0.89
	5	6.6670	3.6750	0.1525	0.4478	15.9100	0.89
	6	9.000	3.6750	0.2763	0.4831	15.9100	0.88
PMB 45/80-65	7	4.1180	5.9900	0.0900	0.1784	14.0000	0.98
	8	4.9980	5.9980	0.1203	0.2243	14.4600	0.98
	9	7.2380	4.4240	0.3190	0.3270	14.4600	0.89
	10	7.2000	4.2400	0.3955	0.3634	16.6300	0.89

#### 4 Conclusiones

A partir de los resultados de este estudio, se pueden obtener las siguientes conclusiones.

El modelo planteado para mezclas bituminosas ajusta los datos experimentales de forma correcta, entregando valores reológicos del ligante bituminoso ( $\zeta_1$  y  $\eta$ ) y del tipo de árido utilizado ( $\zeta_2$ ). Estos modelos reducen el número de constantes reológicas en comparación a otros modelos clásicos, permitiendo que los exponentes fraccionarios describan el significado físico de transición entre el estado elástico y viscoso del material.

La metodología planteada permite correlacionar a través de los modelos mecánicos las deformaciones ocurridas en mezclas y ligantes bituminosos, a partir de los ensayos de compresión uniaxial y MSCR respectivamente. Generando ahorrar recursos energéticos a futuro a través de la predicción de las deformaciones tanto en mezclas y/o ligantes.

El comportamiento de las mezclas convencionales bajo las diferentes cargas utilizadas generó mayores deformaciones plásticas con el ligante B70/100, ya que este en comparación al B50/70 obtiene menor punto de reblandecimiento y genera deformaciones en el rango no recuperable del fenómeno de fluencia, provocando un aumento del parámetro fraccionario  $\alpha$ .

Las mezclas con ligante PMB45/80-65 obtuvieron la menor deformación plástica, debido a que su reología genera mayor deformación en el rango recuperable (aumento del parámetro  $\beta$ ). Esto se debe a la capacidad de disminuir el movimiento cinético de las partículas del ligante producto de los polímeros de caucho que poseen un estado de inercia mayor.

#### 5 Referencias

- [1] Ahmedzade, Perviz, Kadir Demirelli, Taylan Günay, Fatih Biryant, and Omar Alqudah. "Effects of Waste Polypropylene Additive on the Properties of Bituminous Binder." *Procedia Manufacturing* 2, no. February (2015): 165–70.
- [2] Baaj, Hassan, Peter Mikhailenko, Haya Almutairi, and Herve Di Benedetto. "Recovery of Asphalt Mixture Stiffness during Fatigue Loading Rest Periods." *Construction and Building Materials* 158 (2018): 591–600.
- [3] Cao, Peng, Feng Jin, Zhou Changjun, and Decheng Feng. "Investigation on Statistical Characteristics of Asphalt Concrete Dynamic Moduli with Random Aggregate Distribution Model." *Construction and Building Materials* 148 (2017): 723–33.
- [4] Celauro, C., C. Fecarotti, A. Pirrotta, and A. C. Collop. "Experimental Validation of a Fractional Model for Creep/Recovery Testing of Asphalt Mixtures." *Construction and Building Materials* 36 (2012): 458–66.
- [5] Chen, Jiaqi, Hao Wang, Maoyun Li, and Liang Li. "Evaluation of Pavement Responses and Performance with Thermal Modified Asphalt Mixture." *Materials & Design* 111 (2016): 88–97.
- [6] D, Rong Luo Ph, Hanqi Liu, Ph D Candidate, and Yuqing Zhang Ph D. "Characterization of Linear Viscoelastic, Nonlinear Viscoelastic and Damage Stages of Asphalt Mixtures." *Construction and Building Materials* 125 (2016): 72–80.

- [7] Dong, Fuqiang, Xin Yu, Tianyu Wang, Long Yin, Ning Li, Jingjing Si, and Jia Li. "Influence of Base Asphalt Aging Levels on the Foaming Characteristics and Rheological Properties of Foamed Asphalt." *Construction and Building Materials* 177 (2018): 43–50.
- [8] Fecarotti, Claudia, Clara Celauro, and Antonina Pirrotta. "Linear ViscoElastic (LVE) Behaviour of Pure Bitumen via Fractional Model." *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 53 (2012): 450–61.
- [9] G., Chang Kuo-Neng, and Meegoda Jay N. "Micromechanical Simulation of Hot Mix Asphalt ." *Journal of Engineering Mechanics* 123, no. 5 (May 1, 1997): 495–503. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:5\(495\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:5(495)).
- [10] Graziani, Andrea, Carlotta Godenzoni, Fabrizio Cardone, and Maurizio Bocci. "Effect of Curing on the Physical and Mechanical Properties of Cold-Recycled Bituminous Mixtures." *Materials & Design* 95 (2016): 358–69.
- [11] Han, Meizhao, Jing Li, Yaseen Muhammad, Dianhao Hou, Fenglei Zhang, and Yuhua Yin. "Effect of Polystyrene Grafted Graphene Nanoplatelets on the Physical and Chemical Properties of Asphalt Binder." *Construction and Building Materials* 174 (2018): 108–19.
- [12] Lagos-Varas, M., D. Movilla-Quesada, J.P. Arenas, A.C. Raposeiras, D. Castro-Fresno, M.A. Calzada-Pérez, A. Vega-Zamanillo, and J. Maturana. "Study of the Mechanical Behavior of Asphalt Mixtures Using Fractional Rheology to Model Their Viscoelasticity." *Construction and Building Materials*, 2019.
- [13] Lei, Yong, Hainian Wang, Xi Chen, Xu Yang, Zhanping You, Shi Dong, and Junfeng Gao. "Shear Property , High-Temperature Rheological Performance and Low-Temperature Flexibility of Asphalt Mastics Modified with Bio-Oil." *Construction and Building Materials* 174 (2018): 30–37.
- [14] Li, Peilong, Xiuming Jiang, Kai Guo, Yu Xue, and Hao Dong. "Analysis of Viscoelastic Response and Creep Deformation Mechanism of Asphalt Mixture." *Construction and Building Materials* 171 (2018): 22–32.
- [15] Lin, Juntao, Jinxiang Hong, and Yue Xiao. "Dynamic Characteristics of 100% Cold Recycled Asphalt Mixture Using Asphalt Emulsion and Cement." *Journal of Cleaner Production* 156 (2017): 337–44.
- [16] Loverro, Adam. "Fractional Calculus: History, Definitions and Applications for the Engineer." *Report*, 2004, 1–28.
- [17] Ma, Tao, Hao Wang, Deyu Zhang, and Yao Zhang. "Heterogeneity Effect of Mechanical Property on Creep Behavior of Asphalt Mixture Based on Micromechanical Modeling and Virtual Creep Test." *Mechanics of Materials* 104 (2017): 49–59.
- [18] Mangiafico, Salvatore, Hervé Di Benedetto, Cédric Sauzéat, François Olard, Simon Pouget, and Luc Planque. "Effect of Colloidal Structure of Bituminous Binder Blends on Linear Viscoelastic Behaviour of Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement." *Materials and Design* 111 (2016): 126–39.
- [19] Saltan, Mehmet, Serdal Terzi, and Sebnem Karahancer. "Examination of Hot Mix Asphalt and Binder Performance Modified with Nano Silica." *Construction and Building Materials* 156 (2017): 976–84.
- [20] Shi, Xingang, Liangcai Cai, Wei Xu, Jing Fan, and Xinhang Wang. "Effects of Nano-Silica and Rock Asphalt on Rheological Properties of Modified Bitumen." *Construction and Building Materials* 161 (2018): 705–14.
- [21] Singh, Dharamveer, and Dheeraj Sawant. "Understanding Effects of RAP on Rheological Performance and Chemical Composition of SBS Modified Binder Using Series of Laboratory Tests." *International Journal of Pavement Research and Technology* 9, no. 3 (May 1, 2016): 178–89.
- [22] Sunarjono, Sri. "Performance of Foamed Asphalt under Repeated Load Axial Test." *Procedia Engineering* 54 (2013): 698–710.
- [23] Wu, Qiang, Chong Wang, Rui Liang, Yongchang Liu, Jixiang Cheng, and Yang Kang. "Fractional Linear Viscoelastic Constitutive Relations of Anhydride-Cured Thermosetting Rubber-like Epoxy Asphalt Binders." *Construction and Building Materials* 170 (2018): 582–90.
- [24] Yao, Zhanyong, Jizhe Zhang, Faliang Gao, Shengjie Liu, and Tenghai Yu. "Integrated Utilization of Recycled Crumb Rubber and Polyethylene for Enhancing the Performance of Modified Bitumen." *Construction and Building Materials* 170 (2018): 217–24.
- [25] Zaumanis, M, L D Poulidakos, and M N Partl. "Performance-Based Design of Asphalt Mixtures and Review of Key Parameters." *Materials & Design* 141 (2018): 185–201.